

· 光学设计与制造 ·

近朗伯光型 LED 透镜的光学设计

夏勋力, 余彬海, 麦镇强

(佛山市国星光电股份有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要:根据朗伯光源的特点, 定义近朗伯光源函数, 设计 LED 透镜的光学模型, 求得 LED 的截面曲线方程, 运用龙格—库塔法求解方程并在 MATLAB 中使用多项式拟合获得相关数据及修正后的数据, 通过 Tracepro 仿真得到希望的 LED 近朗伯光源封装模型数据及仿真效果. 提出一种 LED 近朗伯光源光学模型封装的简化设计方法.

关键词:LED; 朗伯光源; 近朗伯光源; 光束角

中图分类号: TN312⁺.8; O47

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)01-0022-04

Design on Approximate Lambertian LED Opto Lens Configuration

XIA Xun-li, YU Bin-hai, MAI Zhen-qiang

(Foshan Nationstar Optoelectronics Co. Ltd, Foshan 528000, China)

Abstract: According to the characteristics of Lambertian source, an approximate Lambertian source function was defined, an optical model of LED lens was designed, and then a LED sectional curve equation was obtained. Some relative data and modified data were obtained through solving the equation above by Runge-kutta method and a polynomial fitting by MATLAB. The expecting data and simulated effect were extracted from LED approximate Lambertian source encapsulation model by Tracepro. Finally, a simplified designation method for LED approximate Lambertian source encapsulation model was proposed.

Key words: LED; Lambertian source; approximate Lambertian source; beam angle

朗伯光源是自然界广泛存在的一种光源, 太阳、毛玻璃灯罩、积雪、白墙均可看作朗伯光源. LED 芯片本身就是朗伯光源, 发光光束角 $2\theta_{1/2}$ 为 120° , 由于光束角较大, 其发光强度较低, 且早期的芯片光电转换效率也较低, 为获得较大的光强, 需要设计 LED 的封装透镜光学结构, 控制 LED 的出光光束角, 将其光束集中在一定的方向, 于是便出现了不同光束角如 120° 、 90° 、 60° 、 30° 等的 LED 器件. 光束角为 120° 的 LED 朗伯光型光源各向同性, 是较理想的光型^[1]. 对应其他发光光束角的 LED 器件, 通常设计为近朗伯光源的封装光学透镜以期获得较好的出光光型.

目前 LED 技术飞速发展, 大功率 LED 器件流

明发光效率已达到 100 lm/W 的较高水平. 这些不同光束角的 LED 器件作为局部定向信号或照明光源, 其应用灵活、可选择性强, 但其性价比仍然偏高. 近朗伯光源器件的设计应用可减小 LED 数量、增加节能效果、降低工程造价、提高 LED 半导体光源的应用水平^[2].

1 朗伯光源

在光度学中, 朗伯光源在某一方向上的发光强度 I_θ 等于该光源发光面垂直方向上的发光强度 I_0 乘以方向角的余弦, 如图 1, 朗伯体也称为余弦发射体, 朗伯光源又称为余弦体光源. 朗伯光源在 θ 角

收稿日期: 2009-10-29

基金项目: 电子信息产业发展基金(工信部电子[2009]64号)

作者简介: 夏勋力(1965-), 男, 湖北人, 高级工程师, 主要从事 LED 器件及半导体照明技术研究工作.

方向光强为

$$I_{\theta} = I_0 \cos \theta \quad (1)$$

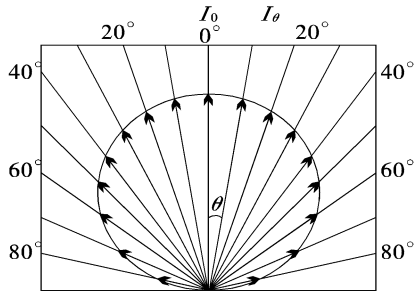


图 1 朗伯光源 $I_{\theta} = I_0 \cos \theta$

在 LED 的许多应用中,人们希望 LED 器件发光表现为朗伯光源特征.如 LED 显示屏、LED 信号灯等,此时要求光源能在各个方向上的亮度一致.据光度学亮度定义如图 2,对应朗伯光型的 LED 光源在 θ 角方向亮度为

$$L_{\theta} = I_{\theta} / d s \cos \theta = I_0 / d s \quad (2)$$

式中, L 的单位为尼特, $1 \text{ nt} = 1 \text{ cd}/\text{m}^2$; d 为透镜厚度.

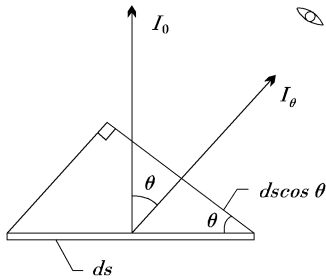


图 2 光源亮度定义图

由式(2)知,任意方向的 $L_{\theta} = I_0 / d s$ 为一定值,故人眼在任意方向观看朗伯光源所感知的亮度是相同的,即所谓朗伯光源是各向同性光源.

通常 LED 行业将 LED 器件的光束角 $2\theta_{1/2}$ 作为衡量光束发光角度标准.半值角 $\theta_{1/2}$ 是指 LED 发光强度值为轴向强度值一半时的发光方向与发光轴向(法向)的夹角.由式(1)知, $I_{\theta} = I_0 / 2$, $\cos \theta = 1/2$, 故朗伯型光源的出光光束角 $2\theta_{1/2}$ 为 120° .

2 近朗伯光源

在 LED 一些应用中,要求光束能集中在一定的方向上.如光束角 $2\theta_{1/2}$ 为 90° 、 60° 、 30° 等的 LED 器件,其光束角 $2\theta_{1/2}$ 不等于 120° , 此时 LED 器件发光不能表现为朗伯光源特征,但在 LED 行业通常用朗伯光源来衡量 LED 光源配光质量,于是出现了非理

想余弦分布的近朗伯光源 LED 器件,虽然亮度不能各向同性,但近朗伯光源也能表现出符合人眼视觉特征的某些特点,如光强分布曲线可导、亮度连续变化等,其光强分布函数可以表示为

$$I_{\theta} = I_0 \cos^m \theta \quad (3)$$

根据光束角的定义,可以知道,当 $\theta = \theta_{1/2}$, 有 $I_{\theta} = I_0 / 2$, 求解式(3)得

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})}$$

根据不同的光束角,可以计算出相应的 m 值,并得到其光强分布函数曲线.当 $2\theta_{1/2} = 90^\circ$ 时, $m = 2$, 光强分布函数为: $I_{\theta} = I_0 \cos^2 \theta$; 当 $2\theta_{1/2} = 60^\circ$ 时, $m = 4.82$, 光强分布函数为: $I_{\theta} = I_0 \cos^{4.82} \theta$. 依此类推,同样可以求得较常用的 45° 、 30° 等近朗伯光源的 m 值并获得其光强分布函数,图 3 是光束角 $2\theta_{1/2}$ 分别为 120° 的朗伯, 90° 、 60° 近朗伯光源发光强度矩形分布图.

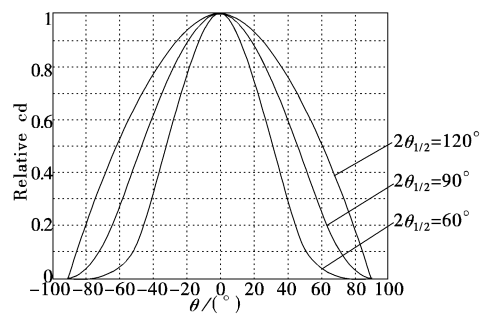


图 3 矩形光强分布图

3 近朗伯光型 LED 透镜设计

在 LED 器件外封设计时,理想情况下,通常假定 LED 芯片发光为朗伯光源,不考虑透镜材料的吸收,透镜的光反射、散反射、散透射等因数,则 LED 的出光特性主要是由封装材料的折射率、透镜的几何形状、芯片与透镜的相对位置来决定^[3]. 基本光学模型及光路图见图 4.

设芯片在 A 点,光线 AB 与光轴 Z 夹角为 θ , B 点是 θ 角光线在透镜中的光出射点, B 点坐标 (z_2, y_2) , Y、Z 轴是距离为 L 的目标光场坐标轴, d 为透镜厚度,设透镜折射率为 n , 空气折射率为 l , 根据折射定律,有: $\sin \theta'_1 = n \sin \theta_1$. 曲线斜率即曲线的导数 $dy_2 / dz_2 = \tan \beta$, 结合折射定律,有

$$\frac{dy_2}{dz_2} = -\frac{n \cos \theta - \cos u}{n \sin \theta - \sin u} \quad (4)$$

由图4可知 $y_2 = (d + z_2) \tan \theta$ (5)

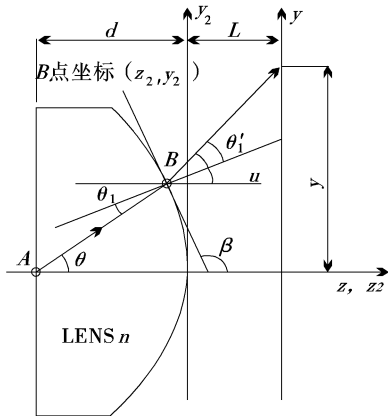


图4 LED光路图

式(5)两端微分得 y_2 值和 θ 值的关系

$$\frac{dy_2}{d\theta} = \frac{d + z_2}{\cos^2 \theta} + \tan \theta \frac{dz_2}{d\theta} \quad (6)$$

联立式(4)、式(6),可以得到

$$\frac{dz_2}{d\theta} = -\frac{\frac{d + z_2}{\cos^2 \theta}}{\frac{n \cos \theta - \cos u}{n \sin \theta - \sin u} + \tan \theta} \quad (7)$$

光束角 $2\theta_{1/2} = 90^\circ$ 的 LED 出光分布可以表示为: $\cos^2 u = \cos \theta$.

将 u 代入式(7),可以得到 z_2 与 θ 的一一对应关系. $dz_2/d\theta$ 是一个复杂的微分方程. 为得到 $z_2 = f(\theta)$, 需要运用数学方法进行处理, 由图4可知, 有初始条件 $\theta = 0, z_2 = 0$, 根据初始条件以及已知的 $dz_2/d\theta$ 方程式, 在给定 Δ 以及透镜厚度 d 以后, 以 θ 为自变量, 设定一定的步长 $\Delta\theta$, 运用龙格-库塔法或其他数学算法可解出一系列 $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n$, 以及它们一一对应的 z_2 值. 再通过式(5)得到对应的 y_2 值. 在得到一系列的 (z_2, y_2) 以后, 使用多项式拟合可得到平凸透镜的非球面截面曲线方程式

$$z_2 = \sum_{i=1} a_i y_2^{(2i)} + c \quad (8)$$

式中, c 为多项式的常数项; i 值大小视曲线拟合精度选取. 确定 a_i 值后导入 tracepro 软件可获得希望的 光学模型及配光效果, 下面是一个设计实例.

设封装高度即透镜厚度 $d = 3.5 \text{ mm}$, 材料折射率 $n = 1.53419$, 设计要求 LED 器件的光束角 $2\theta_{1/2}$ 为 90° . 运用龙格-库塔法, 在 MATLAB 中可以解出符合光束角 $2\theta_{1/2} = 90^\circ$ 的光学模型截面曲线点数据集 (z_2, y_2) 见图5, 截面曲线如图6.

从图5数据及图6可以发现 y 坐标存在内拐的情况. 不难看出曲线的末端部分向内拐, 在 (z_2, y_2)

Index	Y2	Z2
1	0	0
2	0.2236	-0.01108
3	0.44478	-0.04417
4	0.66119	-0.09874
5	0.87056	-0.17397
6	1.0708	-0.26874
7	1.25999	-0.38166
8	1.43644	-0.51109
9	1.59872	-0.65524
10	1.74567	-0.81215
11	1.87642	-0.97977
12	1.9904	-1.15601
13	2.08729	-1.33878
14	2.16709	-1.52603
15	2.23003	-1.71577
16	2.2766	-1.90614
17	2.30749	-2.09542
18	2.32363	-2.28202
19	2.32611	-2.46458
20	2.31622	-2.6419
21	2.29546	-2.81302

图5 截面曲线数据1

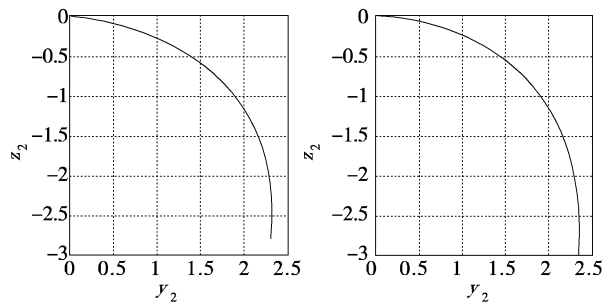


图6 LED截面曲线图 图7 修正后的LED截面曲线图

Index	Y2	Z2
1	0	0
2	0.22369	-0.00962
3	0.44552	-0.03838
4	0.66367	-0.08595
5	0.87636	-0.15182
6	1.0819	-0.23526
7	1.2787	-0.33537
8	1.46529	-0.45107
9	1.64036	-0.58114
10	1.80276	-0.72424
11	1.95151	-0.87891
12	2.08583	-1.04363
13	2.20511	-1.2188
14	2.30896	-1.3988
15	2.3972	-1.58203
16	2.46982	-1.77087
17	2.52705	-1.96177
18	2.56928	-2.15326
19	2.59713	-2.34394
20	2.61143	-2.53253
21	2.61324	-2.71791

图8 截面曲线数据2

数据集中, y 值在到达 $y_{\max} = y_{19}$ 后开始回归, 按照这种结构设计的 LED 塑封虽可达到希望的配光效

果,但工艺上无法脱模.需要对曲线进行修正,去除内拐并给予一定的脱模斜度.修正后截面曲线见图 7,此时 LED 的出光分布发生了一些变化,不再与图 3 对应的配光曲线图严格吻合,而且角度越小,偏离得越多.这时需要对预期的出光分布进行修正,加入更多的朗伯影响因素,预期出光分布修正为

$$\cos u = (m \cos^{1/m} \theta + \cos \theta) / (m + 1) \quad (9)$$

修正后重新运用龙格-库塔法计算,得到一组 (z_2, y_2) 的数据如图 8.对图 8 数据进行处理取 $c = 0, i = 8$,使用式(8)在 MATLAB 中求解拟合多项式系数为: $a_1 = -0.1729; a_2 = -0.0895; a_3 = 0.1198; a_4 = -0.008289; a_5 = 0.0304; a_6 = -0.006113; a_7 = 0.0006357; a_8 = -2.679e-005$.拟合曲线如图 9,将所得数据代入 TracePro 中进行光学模拟.并对封装高度 3.5 mm 做一定的微调,所得到配光曲线如图 10 所示.可以看出,所得到的光束角 $2\theta_{1/2}$ 约 90° ,与上面的理想曲线基本相符合.

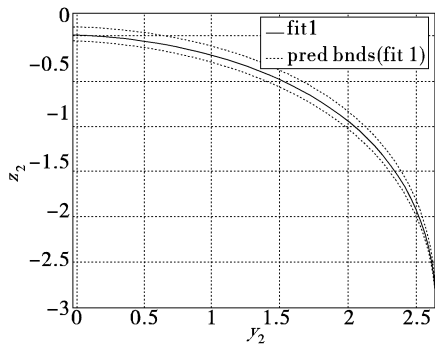


图 9 拟合曲线图

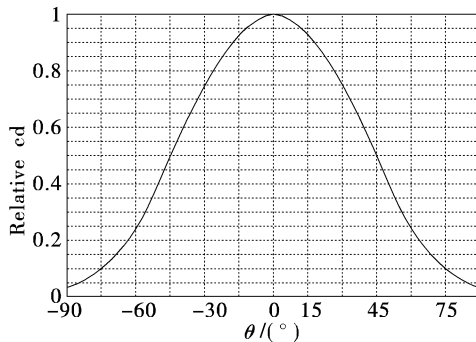


图 10 非球面模型矩形配光分布曲线图

4 近朗伯光型 LED 的简化设计方法

根据 LED 光学模型并利用数学处理方法,可得到精确的 LED 封装结构设计数据,通过光学仿真和样板制作能达到预期的设计效果,然而以往的设计

经验表明,可以通过简化光学模型,用球面取代复杂的非球面设计以得到更快速、更好控制的 LED 模型数据.分析所得 (z_2, y_2) 数据集和拟合曲线可发现,曲线有近似圆的轨迹特征.用公式 $R = (z^2 + y^2) / (2z)$ 可求出各点圆半径 R ,虽然 R 大小不一致,却都趋向一个值.所以不妨采用球半径 R 的球面代替非球面,相信可以达到同样的效果,按照上述想法建立的 LED 球面简化模型见图 11.当芯片大小以及 LED 外封的材料确定以后,影响其出光分布的就是顶部半球的球半径 R 以及底部高度 h .下面对半球半径 R 对出光的影响进行分析,设定 LED 外封微调后的总高度为 3.7 mm, $R = 2.6, h = 1.1$,在 TracePro 中建立一个图 11 所示的光学模型,运用 TracePro 对其模型进行光学仿真结果见图 12,仿真所得的光束角 $2\theta_{1/2}$ 约 90° ,与理想模型基本一致.

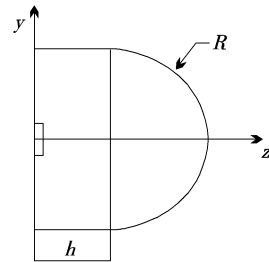


图 11 LED 球面简化模型

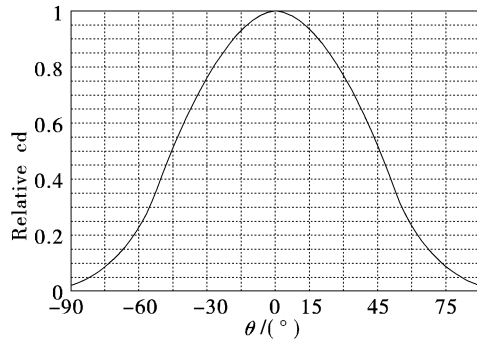


图 12 简化模型矩形配光分布曲线图

同样的方法也可以用到其他出光角度的 LED 封装设计,使用简化模型方法设计方便快捷,早期的 LED 封装一般都是半球结构,工艺上易于实现,该法是 LED 行业广泛使用的一种 LED 器件配光结构设计方法^[4].

5 结束语

朗伯及近朗伯光型是 LED 行业通用标准的 LED 封装配光型,文中介绍了这种光源的 LED

(下转第 37 页)

- 2002, 14(10): 1442 – 1444.
- [12] Rabus D G, Hamacher M, Heidrich H. Resonance frequency tuning of a double ring resonator in GaInAsP/InP: Experiment and simulation [J]. *Jpn J Appl. Phys.*, 2002, 41(2B): 1186 – 1189.
- [13] Kim D G, Shin J H, Ozturk C, et al. Total internal reflection mirror-based InGaAsP ring resonators integrated with optical amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(9): 1899 – 1901.
- [14] Absil P P, Hryniewicz J V, Litter B E, et al. Vertically coupled microring resonators using polymer wafer bonding[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, 13(1): 49 – 51.
- [15] Grover R, Van V, Ibrahim T A, et al. Parallel-cascaded semiconductor microring resonators for high-order and wide-FSR filters[J]. *IEEE J Lightwave Technol.*, 2002, 20(5): 900 – 905.
- [16] Schwelb O, Frigyes I. Series-coupled microring resonator filters with embedded semiconductor optical amplifiers[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, 42(5): 427 – 432.
- [17] Ma C, Yan X, Wang X, et al. Box-like spectral response of 2-D microring resonator arrays [J]. *Opt. Commun.*, 2007, 273: 105 – 113.
- [18] Litter B E, Chu S T, Absil P P, et al. Very High-Order Microring Resonator Filters for WDM Applications [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(10): 2263 – 2265.
- [19] Hryniewicz J V, Absil P P, Litter B E, et al. Higher order filter response in coupled microring resonators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, 12(3): 320 – 322.
- [20] Troppenz U, Hamacher M, Rabus D G. All-active In-GaAsP/InP ring cavities for widespread functionalities in the wavelength domain[C]//Indium Phosphide and Related Materials Conference, 2002: 475 – 478.
- [21] Amarnath K, Grover R, Kanakaraju S, et al. Electrically pumped InGaAsP-InP microring optical amplifiers and lasers with surface passivation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(11): 2280 – 2282.
- [22] Amatya R, Holzwarth C W, Smith H I, et al. Precision tunable silicon compatible microring filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, 20(20): 1739 – 1741.
- [23] Nawrocka M S, Liu T, Wang X, et al. Tunable silicon microring resonator with wide free spectra range[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(7):1107 – 1110.
- [24] Grover R, Ibrahim T A, Kanakaraju S, et al. A tunable GaInAsP-InP optical microring notch filter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(2): 467 – 469.
- [25] Choi S J, Peng Z, Yang Q, et al. Tunable narrow linewidth all-buried heterostructure ring resonator filters using vernier effects [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(1):106 – 108.
- [26] Schwelb O, Frigyes I. All-optical tunable filters built with discontinuity-assisted ring resonators[J]. *J Lightwave Technol.*, 2001, 19(3): 380 – 386.
- [27] Rostami A, Rostami G. All-optical implementation of tunable low-pass, high-pass, and bandpass optical filters using ring resonators[J]. *J Lightwave Technol.*, 2005, 23(1): 446 – 460.
- [28] Rostami A, Abbasian K. All-optical filter design: Electromagnetically induced transparency and ring resonator [C]// IEEE International conference on telecommunications, ICT-MICC 2007: 51 – 56.
- [29] Robinson J T, Chen L, Lipson M. On-chip gas detection in silicon optical microcavities[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(6): 4296 – 4301.
- [30] Li X, Zhang Z, Qin S, et al. Sensitive label-free and compact biosensor based on concentric silicon-on-insulator microring resonators[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(25): F90 – F94.

(上接第 25 页)

外封设计光学模型及数据处理方法,通过光学仿真能获得较好的设计效果,但实际 LED 器件设计要考虑许多非理想条件,如芯片尺寸、安放位置偏差、材料吸收率、界面散射、反射、外封表面质量等因素,故实际结果与理论设计有一定的差异.通常需要对设计作出适当调整后才能得到准确的实际数据.

参考文献

- [1] 李晓彤.几何光学和光学设计[M].浙江:浙江大学出版社,1997.
- [2] 赵振民.实用照明工程设计[M].天津:天津大学出版社,2003.
- [3] Wei Tai,Rudolf Schwarte.Design of an aspherical lens to generate a homogenous irradiance for three-dimensional sensors with a light-emitting-diode source [J]. *Applied Optics*,2000,39(31):5801-5805.
- [4] D wood.Optoelectronic semiconductor devices[M].UK: Prentice Hall International,1994.
- [1] 李晓彤.几何光学和光学设计[M].浙江:浙江大学出